



DESENVOLVIMENTO DE SERVIÇOS CLIMÁTICOS PARA ANÁLISE DE RISCO EM INFRAESTRUTURA DE LINHA DE TRANSMISSÃO EM SANTA CATARINA

Relatório 3/3 - Mecanismos Dinâmicos Associados à Incidência de Descargas Elétricas em Santa Catarina

Ana Paula dos Santos

Elaborado por:

Ana Paula Paes dos Santos
Kleber Pinheiro Naccarato
André Arruda Rodrigues de Moraes

Essa publicação foi realizada por uma equipe formada por consultores independentes sob a coordenação da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio do projeto Ampliação dos Serviços Climáticos para Investimentos em Infraestrutura (CSI).

Este projeto foi pactuado no âmbito da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável, por meio da parceria entre o Ministério do Meio Ambiente do Brasil e a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), no âmbito da Iniciativa Internacional para o Clima (IKI, sigla em alemão), do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU, sigla em alemão).

Participaram desse processo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Empresa Eletrosul/ Eletrobrás e a Defesa Civil de Santa Catarina.

Todas as opiniões aqui expressas são de inteira responsabilidade dos autores, não refletindo necessariamente a posição da GIZ e do MMA. Este documento não foi submetido à revisão editorial.

EQUIPE TÉCNICA - MMA

Hugo do Valle Mendes (coordenação)
Adriana Brito da Silva
Jaqueline Leal Madruga

EQUIPE TÉCNICA - GIZ

Ana Carolina Câmara (coordenação)
Eduarda Silva Rodrigues de Freitas
Pablo Borges de Amorim

EQUIPE TÉCNICA - DEFESA CIVIL/ SANTA CATARINA

Flavio Rene Brea Victoria
Frederico Moraes Rudorff

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Chou Sin Chan

EQUIPE TÉCNICA - ELETROSUL

Diego Luis Tedesco Dandolini (coordenação)
André Luis Padovan
Jacira Prichula
Rogério Parrela de Amorim
Marisa Bender
Loriane Silveira

Giancarlo Maffezzoli
Márcio Antonio Pavanati
Marcelo Kotani
Julian Luis Reis
Claudia Teresa Pillatti
Raquel Carolina Chinchilla Cartagena

Ministério do Meio Ambiente

Esplanada dos Ministérios, Bloco B, Brasília/DF, CEP
70068-901
Telefone: + 55
61 2028-1206

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Sede da GIZ: Bonn e Eschborn
GIZ Agência Brasília
SCN Quadra 01 Bloco C Sala 1501
Ed. Brasília Trade Center - 70.711-902 Brasília/DF
T + 55-61-2101-2170
E giz-brasilien@giz.de
www.giz.de/brasil

A encargo de:

Ministério Federal do Ambiente, Proteção da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) da Alemanha
BMU Bonn:
Robert-Schuman-Platz 3
53175 Bonn, Alemanha
T +49 (0) 228 99 305-0

Diretora de Projeto:

Ana Carolina Câmara
T:+55 61 9 99 89 71 71
T +55 61 2101 2098
E ana-carolina.camara@giz.de



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	2
2. OBJETIVO.....	3
3. DADOS E METODOLOGIA.....	3
3.1. Modulações Climáticas	4
3.2. Modelo de Regressão para Previsão de Descargas.....	6
3.2.1. Validação dos resultados.....	9
4. RESULTADOS	10
4.1. Contexto histórico.....	10
4.2. Modulações Climáticas – Estudo de Caso.....	11
4.3. Modelo de Regressão Linear Múltipla	19
5. CONCLUSÕES	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

1. INTRODUÇÃO

Na última década, estudos indicaram mudanças em parâmetros climáticos sobre diversas áreas continentais do globo (IPCC. 2007, 2013, 2014). Essas alterações são justificadas pelo aumento de eventos extremos climáticos, tanto pela maior frequência de eventos originados por processos convectivos, quanto por períodos prolongados destes casos, ocasionando diversos impactos à sociedade.

De modo geral, a atividade convectiva sobre determinadas regiões está associada a diversos fatores, influenciados desde escalas locais até a grande escala. Em grande escala, pode-se citar o modo de variabilidade do Oceano Pacífico Equatorial, por meio do fenômeno El Niño Oscilação-Sul (ENOS), que em sua fase quente, chamadas anomalias positivas da Temperatura da Superfície do Mar (TSM), pode favorecer a formação de nuvens convectivas sobre a Região Sul do Brasil (Grimm, 2011). Um exemplo de efeito local é a influência da composição de superfície, como áreas montanhosas e/ou urbanizadas que favorecem o processo de convecção.

No clima regional, a configuração do terreno, o tipo de solo e sua cobertura vegetal ou urbanização, são considerados como aspectos locais, sujeito a pequenas mudanças no tempo, determinando o clima que predomina em determinado lugar, da ordem de centenas de quilômetros quadrados (Santos, 2017a).

Desta forma, uma vez conhecido os padrões do clima atual e os mecanismos de larga escala que influenciam a ocorrência de descargas é possível, através de análises climáticas e estatísticas, inferir a tendência de aumento e/ou redução na quantidade de descargas em um período no futuro (Santos, et al., 2017b). Isto porque os modelos de clima não simulam descargas elétricas. Por outro lado, os modelos são capazes de representar modulações climáticas de larga escala que levam a ocorrência de descargas. Sendo assim, a estimativa de cenários de mudança na descarga elétrica será feita de forma indireta, o que leva à

necessidade de identificar os tipos de modulações climáticas que causam as descargas.

Sendo assim, o atual relatório é composto pelas análises das modulações climáticas associadas à incidência de descargas no Estado de Santa Catarina.

O escopo do relatório inclui uma análise dos padrões atmosféricos e oceânicos que tendem a influenciar no quantitativo de descargas observados no Estado, além análise do desenvolvimento de um modelo para estimativa de descargas. A seguir, serão descritos os dados e a metodologia empregada para a obtenção dos resultados.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo analisar os resultados provenientes dos mecanismos dinâmicos associados à incidência de descargas elétricas em Santa Catarina. Os resultados visam auxiliar na tomada de decisão para adaptação das linhas de transmissão da Eletrosul SA já existentes, bem como no planejamento futuro infraestruturas.

3. DADOS E METODOLOGIA

Este produto está dividido em duas partes principais: (1) a primeira diz respeito às modulações climáticas de grande escala que influenciam a incidência de descargas sobre o Estado de Santa Catarina; (2) a segunda está centrada no desenvolvimento de um modelo de regressão linear múltipla, capaz de simular a ocorrência de descargas, utilizando variáveis preditoras observadas especificamente sobre a região em estudo. Ambos os métodos de análises serão descritos a seguir.

3.1. Modulações Climáticas

O objetivo de realizar um estudo de modulações climáticas é compreender quais os modos de variabilidade e mecanismos dinâmicos estão associados à incidência de descargas atmosféricas, com foco em eventos de intensa atividade elétrica sobre a região em estudo.

A importância de se desenvolver este tipo de trabalho deve-se à carência na literatura de estudos que evidenciem os mecanismos climáticos que modulam a incidência de descargas na América do Sul (Santos, et al., 2017c). Além disso, esses resultados darão suporte ao Produto 4 deste projeto, o qual tratará da compreensão do clima futuro em relação a ocorrência de descargas atmosféricas.

Para desenvolver este resultado, foram utilizados dados de reanálises do “*Climate Forecast System Reanalysis*” (CFSR) e da “*National Oceanic & Atmospheric Administration*” (NOAA), em escala temporal anual para o período compreendido entre os anos de 1998 a 2010. Os dados da NOAA são de anomalia calculados com período de referência de 1981-2010 (30 anos). Foram obtidos os dados dos seguintes campos oceânico-atmosféricos:

- Nível de 200 hPa: altura geopotencial e radiação de onda longa (ROL).

O campo de altura geopotencial representa o trabalho utilizado para levantar uma unidade de massa do nível médio do mar até um dado nível de pressão. A altura geopotencial corresponde a altitude acima do nível do mar em que está um determinado nível de pressão. Este campo é útil visto que um dado nível de pressão não é paralelo a superfície terrestre, e estas variações de altitude do nível de pressão indicam regiões de alta e baixa pressão no geopotencial analisado, e tem a importante característica de guiar sistemas meteorológicos

que atuam em superfície, tendo assim grande importância na previsão do tempo e clima (ESCOBAR, 2006).

O campo de ROL corresponde a radiação emitida pela Terra para o espaço, resultante da emissão dos gases atmosféricos e de superfícies líquidas e sólidas da Terra (Galvão e Fisch, 2000). Baixos valores de ROL, registrados no topo da atmosfera terrestre, são utilizados para áreas de atividade convectiva que estão associadas com a formação de nuvens de convecção profunda (Zhang, 1993).

- Nível sigma 0.2101 (troposfera superior): função de corrente e potencial de velocidade.

A função de corrente é o parâmetro que representa o componente rotacional do fluxo atmosférico e o potencial de velocidade representa a componente não-rotacional do fluxo atmosférico (Coelho et al., 2016). Por meio desses campos é possível aferir as áreas com convergência ou divergência e conseqüente o desfavorecimento ou favorecimento da formação e desenvolvimento de nuvens.

- Nível de 850 hPa: altura geopotencial; umidade específica e componentes zonal e meridional do vento.

A umidade específica corresponde a quantidade de vapor d'água por unidade de massa de ar. A análise das componentes zonal e meridional do vento auxiliam na interpretação da origem e deslocamento de massas de ar com intensa umidade (Santos, 2017).

- Superfície: temperatura da superfície do mar (TSM).

A temperatura da superfície do mar (TSM) é comumente apontada como um parâmetro base para a compreensão de anomalias climáticas no globo (Coelho, et al., 2016).

A compreensão e interpretação das modulações climáticas associadas à incidência de descargas foram baseadas na análise da correlação espacial entre os campos oceânico-atmosféricos aferidos juntamente com a série histórica de dados de descargas. Wallace e Gutzler (1981) sugeriram este tipo de análise para confecção de mapas que sumarizassem as configurações de correlação em um campo de teleconectividade, ao qual apresentaria as regiões com correlações mais fortes, sendo obtidos assim, os padrões dominantes da atmosfera e do oceano. Esta técnica recentemente foi utilizada por Coelho et al. (2016), e por Santos et al. (2017) apresentando resultados satisfatórios em estudos que avaliavam os mecanismos e teleconexões que influenciam o clima do Sudeste do Brasil.

3.2. Modelo de Regressão para Previsão de Descargas

Após a determinação das modulações climáticas de grande escala, houve a necessidade de descrever como este fenômeno tende a se comportar em função de variáveis de influência local. Sendo assim, visando aplicar uma metodologia que viabilizasse realizar esta análise de maneira objetiva, fez-se uso de duas técnicas estatísticas, a regressão e a correlação. Este resultado, juntamente com o de modulações climáticas serão bases essenciais para a análise do clima futuro, a ser realizada no Produto 4 deste projeto.

A técnica de regressão permite determinar uma função matemática que descreve o comportamento de determinada variável dependente (explicada ou prevista) em função da dinâmica de outras variáveis independentes (explanatórias ou preditoras). A regressão linear múltipla consiste em uma técnica de análise multivariada e possibilita

avaliar a relação entre uma única variável prevista e duas ou mais variáveis preditoras e realizar previsões futuras a partir desta relação (Corrar et al., 2007; Wilks, 2011).

Como resultado final desta análise, tem-se o produto contextualizado de todas as partições envolvidas. Por meio desta técnica, também é possível determinar o peso individual que cada variável possui para explicar as previsões. Como, em geral, os fenômenos da natureza têm essência multivariada e não dependentes de um único fator (Volpato e Barreto, 2011), essa técnica torna-se então de grande relevância. A análise de correlação permite aferir o grau de relação entre as variáveis em questão (Corrar, et al., 2007; Wilks, 2011).

Deste modo, para este produto, a variável dependente constitui-se a atividade de descargas atmosféricas registradas em todo o Estado de Santa Catarina e as variáveis independentes compreendem: o índice CAPE (Energia Potencial Disponível para Convecção), temperatura máxima do ar, precipitação total e ROL (observada sobre o Estado de SC no nível de 200 hPa).

Em geral, o desenvolvimento de tempestades com a produção de descargas depende da presença de condições ambientes favoráveis à ocorrência de convecção profunda. O índice CAPE foi selecionado, dentre outros fatores, por ser um parâmetro que indica a suscetibilidade de um estado de instabilidade termodinâmica da atmosfera (Tavares e Da Mota, 2012). A ocorrência de temperaturas muito elevadas também contribui para a evaporação e conseqüente formação de nuvens de tempestades e a precipitação, assim como a produção de descargas, as quais resultam da formação de nuvens profundas (Santos, 2017a). Por fim, a ROL pode ser usada de maneira confiável, principalmente em grandes escalas de tempo – como é o caso deste estudo – para detectar áreas de atividade convectiva que estão associadas com a formação de nuvens de convecção profunda (Zhang, 1993). Outro motivo para a utilização destas variáveis é que todas encontram-se disponíveis tanto em dados de análise do CFSR como no modelo Eta-CPTEC, o qual será

utilizado no Produto 4. Com isso, otimiza-se o trabalho para execução das atividades relacionadas às projeções futuras.

A combinação de variáveis independentes utilizadas conjuntamente para prever a variável dependente é também conhecida como equação ou modelo de regressão (Corrar et al., 2007; Wilks, 2011). A função do Modelo de Regressão utilizado é apresentada abaixo:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \dots + \beta_n x_n \quad (1)$$

onde,

y = variável dependente;

x_1, x_2, \dots, x_n = variáveis independentes; e

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ = parâmetros da regressão.

O termo β_0 é denominado intercepto ou coeficiente linear e representa o ponto de interseção da reta de regressão com o eixo Y. Os termos $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ são os coeficientes angulares.

Por fim, a principal observação a ser feita ao se trabalhar com modelo de regressão linear múltiplo refere-se ao grau de correlação entre as variáveis, isto é, ao valor do coeficiente de correlação (R). Esse índice, quanto mais próximo de um, indica maior o grau de relação entre as variáveis.

Destaca-se que as variáveis utilizadas foram selecionadas por meio de testes em que foi avaliado o maior coeficiente de correlação entre estas e a atividade das descargas atmosféricas. Outrossim, ressalta-se que o número de variáveis utilizadas no modelo de regressão também foi testado, tendo sido utilizado a quantidade considerada mais adequada para este tipo de análise, de modo que, não saturasse o modelo.

Na regressão linear múltipla os cálculos consideram também a inter-relação existente entre as variáveis independentes. À medida em

que as variáveis independentes são correlacionadas, elas compartilham uma parte do seu poder preditivo, isto é, cada variável independente explica uma parcela da variável dependente.

3.2.1. Validação dos resultados

Um dos obstáculos associados aos modelos de regressão linear (ou modelos de predição) é o chamado “*overfitting*”, que ocorre quando não se tem acesso completo à série de dados ou quando a quantidade de amostras é relativamente pequena, fazendo com que o modelo fique condicionado apenas aos dados de treino, falhando a validação, quando diferentes dados são utilizados. Uma das alternativas para esse tipo de problema é a aplicação da técnica de validação cruzada *k-fold* (Soares et al., 2017).

Neste método, o conjunto de treinamento original é subdividido em k subconjuntos. Destes k subconjuntos, um subconjunto é conservado para ser utilizado como teste e os demais $(k - 1)$ subconjuntos são utilizados para o treinamento. O processo de validação cruzada consiste em repetir esse procedimento k vezes, de modo que cada um dos k subconjuntos sejam utilizados, exatamente uma vez, como dado teste para a validação da hipótese (ou simulação). O objetivo de repetir os testes múltiplas vezes é de aumentar a confiabilidade da estimativa. O resultado final deste processo é o desempenho médio dos k testes, denominado acurácia.

Neste produto, o período de dados para a validação é o mesmo aplicado no modelo de regressão, e o método foi utilizado de forma que o conjunto de dados foi dividido em 6 subconjuntos, isto é, em cada simulação, 5 subconjuntos foram utilizados para treinamento e 1 subconjunto foi utilizado para teste.

4. RESULTADOS

Nesta seção são mostrados os resultados das análises, abordando a compreensão das modulações climáticas associadas à incidência de descargas em Santa Catarina e o Modelo de Regressão Linear utilizado para estimar a ocorrência de descargas (variável dependente) com base em nas variáveis atmosféricas básicas (variáveis independentes).

4.1. Contexto histórico

A Figura 1 apresenta a variabilidade anual da densidade de descargas no Estado de SC, com destaque em azul para o período em que serão feitas as análises, em virtude do período final da amostra de dados de reanálise do CFSR, que abrangem o período de janeiro de 1979 a janeiro de 2011. Por meio dessa Figura pode-se observar que, para esse período de dados, o evento mais intenso de ocorrência de descarga ocorreu no ano de 2002, seguido pelo ano de 1998. Apesar de não ser objeto desta análise, vale destacar que o ano de 2015 foi o mais extremo até o ano de 2018. Mesmo assim, nota-se que o ano de 2002 foi um dos mais expressivos, e por estes motivos, o ano de 2002 foi selecionado para o estudo de caso.

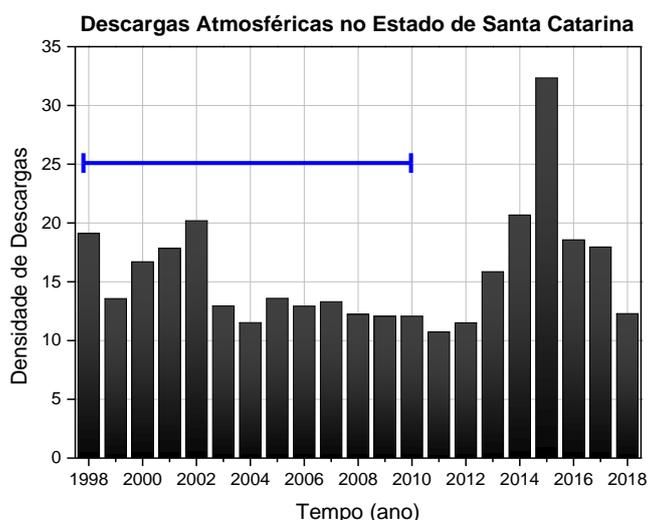


Figura 1 – Série histórica de dados de densidade de descargas observados no Estado de Santa Catarina, no período de 1998 a 2018. A linha azul representa o período utilizado para treino do modelo de regressão.

4.2. Modulações Climáticas – Estudo de Caso

A temperatura da superfície do mar (TSM) é comumente apontada como um parâmetro base para a compreensão de anomalias climáticas (Coelho et.al., 2016). Desta forma, a Figura 2 apresenta a correlação simultânea entre as descargas atmosféricas observadas em Santa Catarina e a TSM global. Nota-se um padrão de oscilação entre correlações positivas e negativas sobre o sul dos oceanos Índico, Pacífico e Atlântico.

Valores positivos de correlação sugerem relação direta entre as temperaturas da superfície oceânica e a atividade elétrica em SC, isto é, quando há temperaturas mais quentes que a média (TSM positiva), a incidência de descargas tende a experimentar um aumento. Ao contrário, quando a TSM é negativa (temperaturas mais baixas que a média), tende a ocorrer uma redução na atividade de descargas. Por outro lado, valores negativos da correlação indicam relação inversa entre as temperaturas da superfície oceânica e a atividade elétrica na região em estudo, ou seja, TSM negativas com o aumento da incidência de descargas sobre SC e TSM positivas com redução da incidência de descargas atmosféricas no Estado.

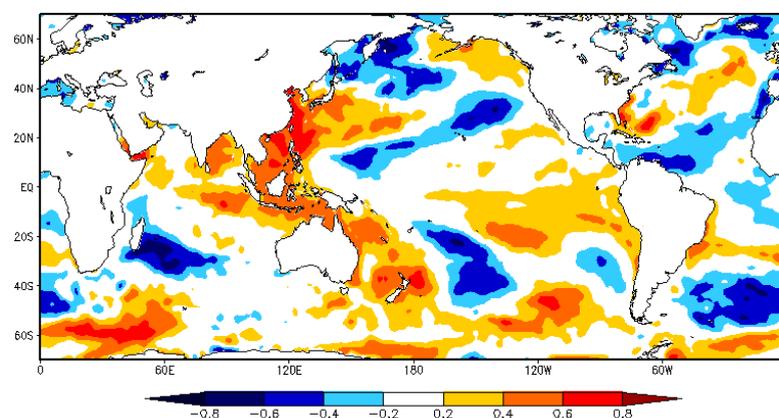


Figura 2 – Correlação espacial entre a densidade de descargas atmosféricas no Estado de Santa Catarina e a TSM em escala anual. Valores positivos de correlação (tons avermelhados) sugerem relação direta entre as temperaturas da superfície oceânica e a atividade elétrica em SC, e valores negativos de correlação (tons azulados) sugerem relação inversa entre as temperaturas da superfície oceânica e a atividade elétrica em SC.

Em regiões ao Sul do continente Africano, ao leste da Austrália abrangendo toda a região oceânica ao redor da Nova Zelândia, no Pacífico Sul em torno de 45°S/115°W e ao longo da costa leste do Brasil, observam-se valores de correlação positiva. O padrão oposto (correlação negativa) pode ser observado em regiões oceânicas no sudeste da África, mais especificamente a leste da Ilha de Madagascar, sobre o Pacífico em torno de 30°S/150°W e em 30°S/90°W e em uma ampla área sobre o Atlântico Sul.

Este padrão de oscilação entre correlações positivas e negativas podem ser consideradas como indicativos de que, durante o período em estudo, a variabilidade dos oceanos Índico, Pacífico e Atlântico Sul explicaram a dinâmica das descargas atmosféricas sobre o Estado de Santa Catarina. Destacam-se, nesta oscilação, o gradiente leste-oeste de áreas oceânicas com correlação de sinais opostos sobre leste do oceano Pacífico Sul e o oeste do Atlântico Sul. Estudos realizados por Fraedrich e Lutz (1986) também identificaram um dipolo leste-oeste sobre regiões oceânicas próximas a essas, sendo este denominado teleconexão da América do Sul, a qual se configura como parte do padrão Pacífico América do Sul (na sigla em inglês – PSA), que conecta a região tropical da Indonésia/Pacífico com a América do Sul (Mo e Ghil, 1987; Ghil e Mo, 1991; Mo e Paegle, 2001). É importante ressaltar também a correlação positiva entre a TSM da região do Pacífico Equatorial/Tropical Sul, sugerindo que a atuação do fenômeno El Niño tende a aumentar a incidência de descargas no Estado de SC.

A Figura 3 mostra a correlação entre a ocorrência das descargas atmosféricas e o campo de altura geopotencial no nível de 850 hPa. Observa-se um padrão de correlação positiva sobre grande parte do

Oceano Índico e regiões continentais adjacentes, sobre o leste do oceano Pacífico Sul e sobre o Brasil e Atlântico central, revelando associação consistente de aumento (diminuição) da pressão atmosférica e aumento (diminuição) da incidência de descargas sobre o Estado de SC. Associação oposta ocorre sobre o leste do oceano Pacífico e no Atlântico Sul, ao qual apresentou um padrão de correlação negativa, mostrando associação consistente entre o aumento (diminuição) da pressão atmosférica sobre este oceano e a diminuição (aumento) da incidência de descargas sobre o Estado. Estes resultados podem ser um indicativo de uma possível relação entre as regiões sul dos oceanos Pacífico e Atlântico e as descargas atmosféricas observadas sobre o Estado de SC.

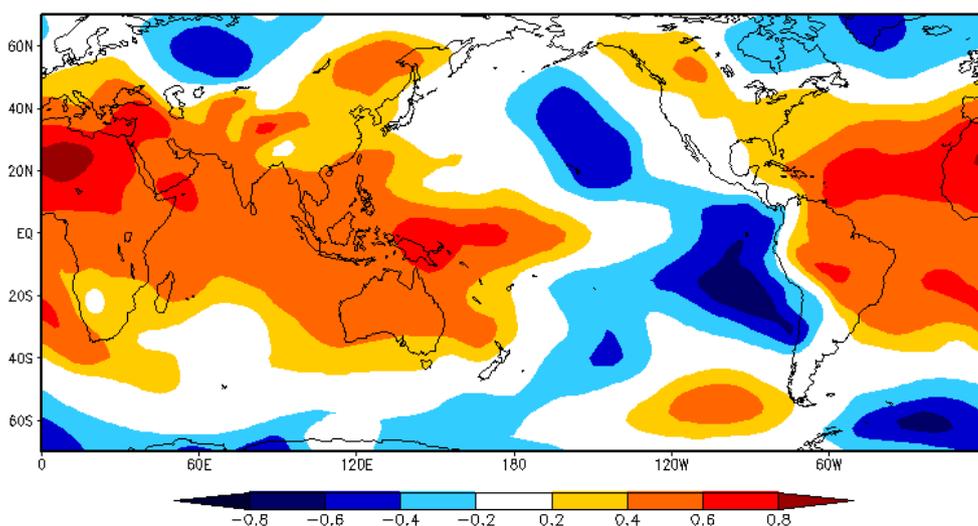


Figura 3 - Idem a Figura 2, mas em relação ao campo de altura geopotencial no nível de 850 hPa.

A Figura 4 apresenta os campos anômalos de TSM e altura geopotencial no nível de 850 hPa observados no ano de 2002. No campo de TSM, observa-se grandes áreas positivas sobre o leste da Austrália, sul do Oceano Pacífico e na região adjacente ao sudeste da América do Sul (no Atlântico). No Pacífico Equatorial também foram observadas anomalias positivas de TSM, associadas ao fenômeno El Niño, que apresentou intensidade moderada nesse ano. Sobre o leste do Pacífico e no Atlântico Sul verificam-se áreas oceânicas com TSM negativas. Esses

padrões estão de acordo com o observado na Figura 2, em que se tinha algumas dessas configurações como indicativos de aumento da incidência de descargas sobre o Estado de SC.

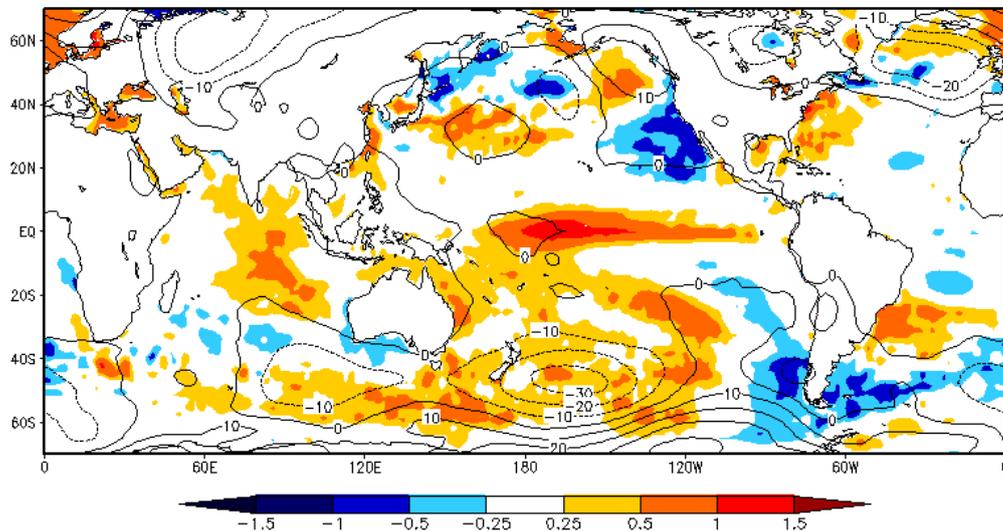


Figura 4 – Campos anômalos de TSM (sombreado) e altura geopotencial (contorno) no nível de 850 hPa observados no ano de 2002.

No campo de anomalia da altura geopotencial no ano de 2002 é possível verificar um centro de anomalias abaixo do normal sobre o centro-sul do Oceano Pacífico, em torno de 50°S/170°W e também sobre o Atlântico Sul. No Pacífico Sul, foram observadas áreas com anomalias positivas centradas em cerca de 80°S/120°W. Estes padrões também estão consistentes com o padrão de correlação da Figura 3, que indicam o favorecimento da incidência de descargas elétricas sobre o Estado.

A Figura 5 mostra os campos anômalos de umidade específica e circulação atmosférica no nível de 850 hPa observados no ano de 2002. Sobre o centro-sul e sul do Pacífico foram observadas anomalias da circulação, com giros nos sentidos horário (anomalia ciclônica) e anti-horário (anomalia anti-ciclônica), respectivamente. Também se observa um ciclone anômalo sobre áreas oceânicas do Atlântico Sul. Estas configurações estão de acordo com as anomalias do campo de altura

geopotencial apresentadas na Figura 2b, na qual também se destacam esses mesmos centros de circulação anômala.

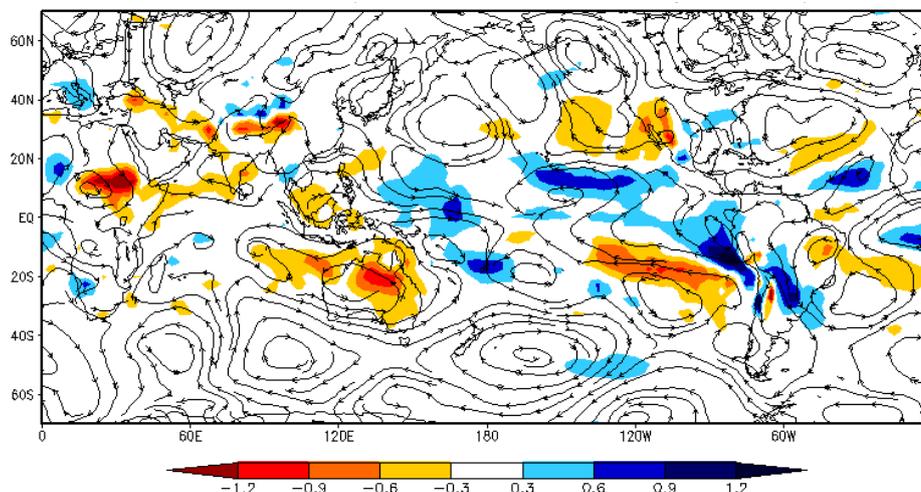


Figura 5 – Campos anômalos de umidade específica (sombreado) e circulação atmosférica (contornos) no nível de 850 hPa observados no ano de 2002.

No campo de umidade específica, verificam-se anomalias positivas em torno de 1,0 g/kg sobre áreas do sudoeste da Amazônia e em direção ao Sudeste da América do Sul, indicando um teor de umidade atmosférica acima do normal sobre estas regiões. Do mesmo modo, têm-se ventos anômalos da região equatorial em direção ao Sul e Sudeste da América do Sul que favorecem o transporte de umidade da Amazônia para esta região. Esta configuração pode estar associada ao Jato de Baixos Níveis (JBN) que faz com que o fluxo de ar úmido vindo do oceano Atlântico Tropical, ao passar pela região Amazônica em direção ao Sul/ Sudeste do Brasil, canalizado pela Cordilheira dos Andes, tende a adquirir maior quantidade de umidade devido à elevada evapotranspiração da floresta, alimentando os sistemas convectivos que ocorrem nestas regiões (Marengo et al., 2004) como, por exemplo, Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) e Sistemas Frontais.

A Figura 6 apresenta a correlação simultânea entre as descargas atmosféricas e a altura geopotencial no nível de 200 hPa. Já a Figura 7

mostra a correlação simultânea entre as descargas atmosféricas e a radiação de onda longa (ROL), também no nível de 200 hPa.

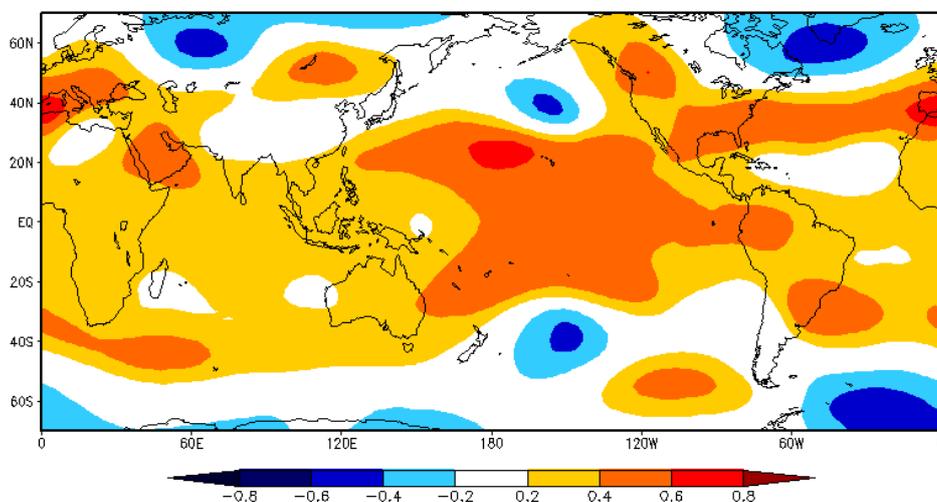


Figura 6 – Correlação espacial entre a densidade de descargas atmosféricas no Estado de SC e campo de altura geopotencial no nível de 200 hPa em escala anual.

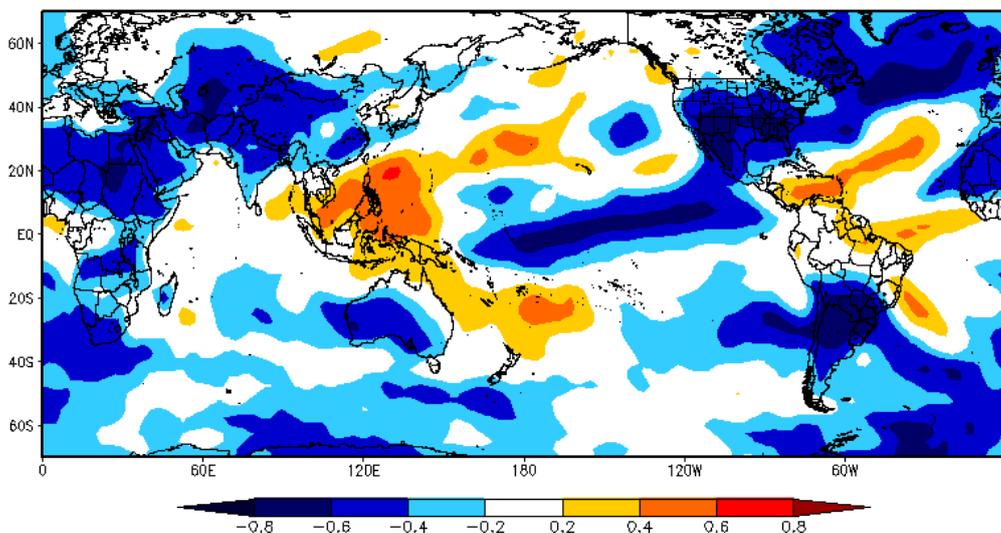


Figura 7 – Idem a Figura 5a, mas para o campo de ROL.

A correlação entre a altura geopotencial (Figura 6) e as descargas atmosféricas mostra que há relação negativa sobre o centro-sul do Pacífico em torno de 40°S/160°W, positiva sobre o sul do Pacífico (aproximadamente entre e 55°S/100°W), negativa sobre o Atlântico Sul e positiva sobre grande parte da América do Sul, sugerindo a influência do

padrão de trem de onda, conectando o Sul dos oceanos Pacífico e Atlântico e a incidência de descargas atmosféricas sobre o Estado de SC.

No campo de ROL (Figura 7), ressalta-se a correlação negativa forte sobre o centro-sul da América do Sul e o oceano Atlântico Sul. Isto é, quando a ROL está abaixo do normal (associado à convecção e nebulosidade), têm-se condições favoráveis para o aumento da incidência de descargas sobre SC. Por outro lado, quando a ROL está acima do normal (representando movimento subsidente e céu claro), têm-se condições favoráveis para a redução da incidência de descargas. O padrão de correlação oposto a este, isto é, correlação positiva, ocorre sobre parte do Norte e Nordeste do Brasil e o Atlântico Tropical. Estas correlações inversas exibem um padrão de dipolo, que pode produzir variações na intensidade e localização da ZCAS (Grimm e Zilli, 2009; Grimm, 2011) e de Sistemas Frontais.

Na análise destes campos observados no ano de 2002 (Figura 8), observou-se um padrão de oscilação entre áreas de baixa e alta pressão, desde o oceano Índico, passando pelo Pacífico, até a América do Sul, sugerindo a atuação de um padrão de trem de onda, consistente com o indicativo da Figura 6. No campo de anomalia de ROL, foram observados valores negativos em áreas do centro-sul da América do Sul, incluindo a região em estudo. Estes valores abaixo do normal estão associados a ocorrência de convecção e nebulosidade acima do normal. Além disso, têm-se a formação de um dipolo entre essas regiões e em áreas do Norte e Nordeste da América do Sul e no oceano Atlântico adjacente que apresentaram valores de anomalias positivas de ROL, padrão este que, como mencionado anteriormente, pode produzir variações na intensidade e localização de sistemas meteorológicos atuantes nestas áreas. Este padrão de anomalia de ROL sobre a América do Sul pode ter sido influenciado pela atuação do fenômeno El Niño, descrito na Figura 3.

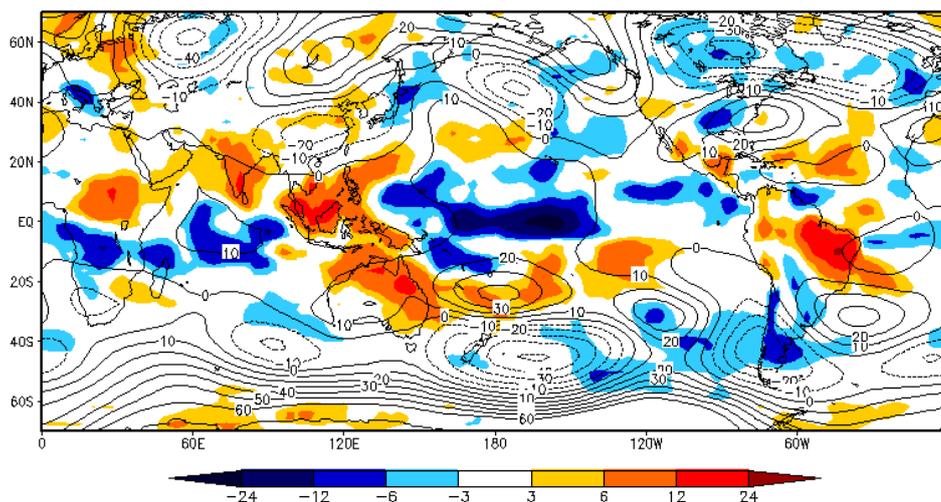


Figura 8 – Campos anômalos de ROL (sombreado) e altura geopotencial (contornos) no nível de 200 hPa observados no ano de 2002.

A Figura 9 apresenta as anomalias de função de corrente e de potencial de velocidade na troposfera superior. No campo de anomalia da função de corrente, variável que representa o componente rotacional do fluxo atmosférico (Coelho et al., 2016), ressalta-se o trem de onda dirigido do oceano Índico para a América do Sul, conforme mencionado no campo de anomalia da altura geopotencial (Figura 6).

No campo de anomalia do potencial de velocidade, variável que representa a componente não-rotacional do fluxo atmosférico (Coelho et al., 2016), observou-se divergência em altitude, representada pelos valores negativos de potencial de velocidade. Isso é indicativo que, em níveis troposféricos mais baixos, houve convergência e consequente favorecimento da formação e desenvolvimento de nuvens, seguindo uma configuração noroeste/sudeste, desde o Oceano Pacífico Tropical até o Sul e Sudeste da América do Sul e o Atlântico adjacente.

Diante de todo o exposto, esta parte dos resultados permitiu o avanço no conhecimento dos mecanismos associados à incidência de descargas atmosféricas no Estado de Santa Catarina. Com ênfase em um evento de intensa atividade elétrica, o presente produto pode servir de embasamento para o conhecimento dos modos de variabilidade climática que influenciam o padrão de ocorrência deste fenômeno na

região e assim evitar ou, pelo menos, minimizar os prejuízos causados pela intensa incidência de descargas.

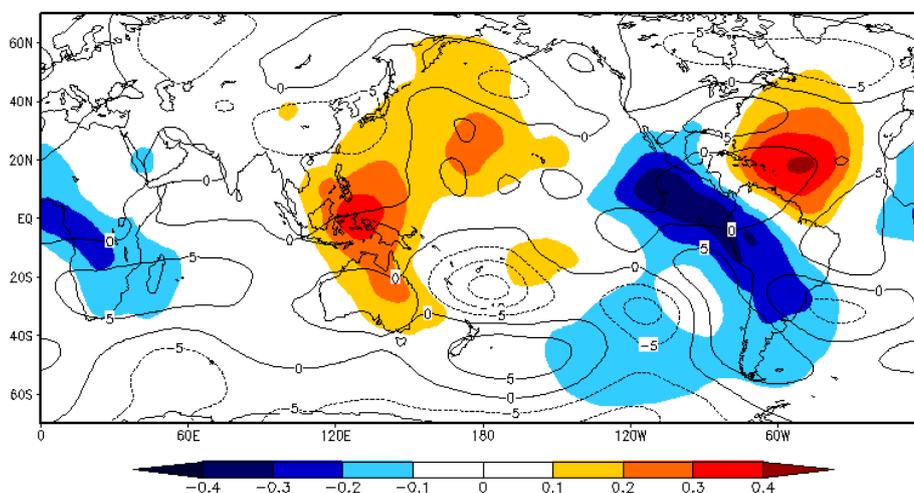


Figura 9 – Campos anômalo de função de corrente (contorno) e de potencial de velocidade (sombreado) na troposfera superior observados no ano de 2002.

4.3. Modelo de Regressão Linear Múltipla

Esta seção apresenta os resultados obtidos no desenvolvimento do modelo de regressão linear múltipla. Para a obtenção destes resultados, foram realizados diversos testes de correlações multivariadas, visando avaliar quais conjuntos de variáveis apresentavam melhor relação com o comportamento das descargas atmosféricas. Nestes testes, verificou-se que, quanto mais variáveis são inseridas no modelo de regressão, mais próximo da relação perfeita com as descargas era obtido ($R \rightarrow 1$). Entretanto, ao realizar a validação do modelo, observou-se que, quando se insere um número muito grande de variáveis, o modelo é forçado a apresentar uma correlação perfeita, independente do número de observações, o que é algo artificial. Desta forma, optou-se pelo uso do menor número de variáveis possível mantendo ainda um resultado satisfatório.

A Figura 10 apresenta uma primeira aproximação para os dados de descargas. Para gerar este resultado, as variáveis independentes

utilizadas foram: CAPE, temperatura máxima do ar, precipitação total e ROL. A Figura 10a mostra a curva dos dados observados e dos dados previstos pelo modelo. Observa-se que o modelo conseguiu representar de forma satisfatória os dados observados, apesar de alguns desvios, como o de subestimativa em “outliers” (tempos 1 e 5). No entanto, trata-se de um erro comum em modelos preditivos. No diagrama de dispersão (Figura 10b) verifica-se que o índice de correlação múltiplo (R_m) apresentou um valor de 0,87 e o R^2 foi de 0,73, representando um ajuste adequado para uso. Na análise do peso de cada variável no modelo (Figura 10c) nota-se que a ROL foi o parâmetro de maior influência (-0,58), enquanto que a precipitação foi o que apresentou a menor influência (-0,17).

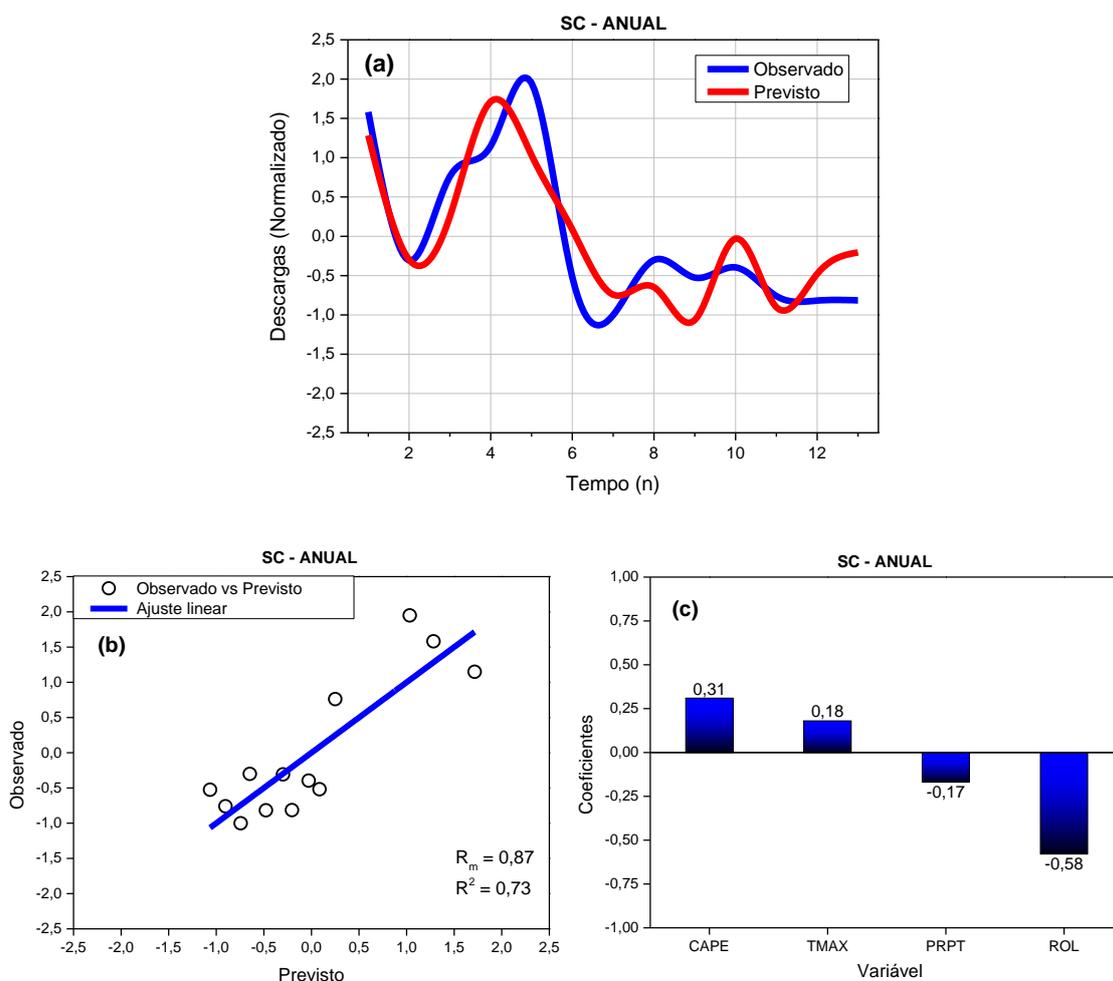


Figura 10 – Modelo de Regressão Linear Múltipla obtida para a previsão de descargas atmosféricas no Estado de Santa Catarina. (a) Comparação entre os dados observados e previstos; (b) Índice de correlação múltiplo; (c) Análise dos pesos das variáveis independentes.

Para a validação do modelo foram realizadas seis simulações onde, em cada simulação, cinco subconjuntos foram utilizados para treinamento e um subconjunto foi utilizado para teste. Os resultados mostraram que todas as simulações foram satisfatórias, com R^2 sempre superior a 0,70 e R_m sempre superior a 0,80, o que ratifica que o modelo desenvolvido pode ser aplicado para diferentes séries de dados utilizando os parâmetros selecionados. O valor máximo obtido nos coeficientes foi observado na simulação 2, que apresentou $R_m = 0,91$ e $R^2 = 0,84$. Por meio das séries temporais dos dados observados e simulados, é possível verificar a preponderância desta simulação, onde, mesmo com as subestimativas nos tempos 3, 7 e 9, houve uma ótima concordância entre as curvas real e prevista.

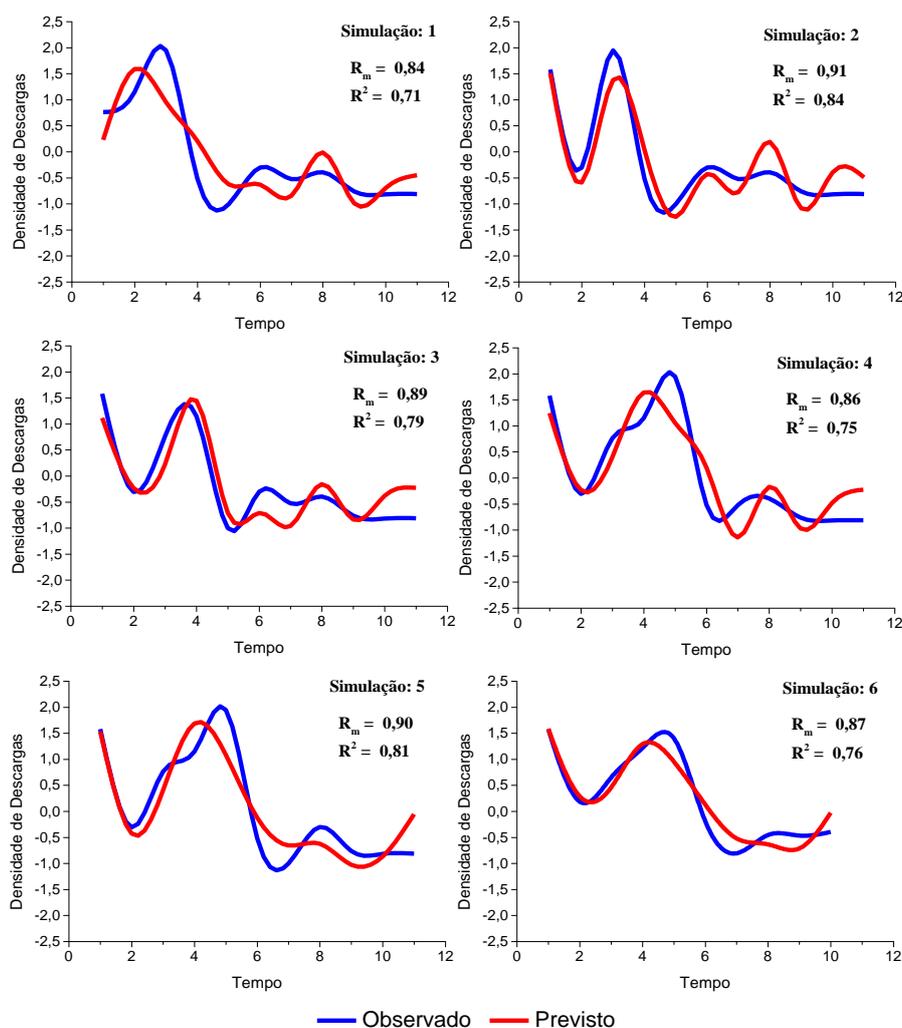


Figura 11 – Séries temporais dos dados de descargas atmosféricas observadas e simuladas utilizadas para a validação do modelo de regressão múltipla.

A partir da acurácia dos resultados, por meio da validação dos mesmos, obteve-se a equação do modelo (Equação 2) baseado na Equação 1:

$$y = -0,004 + 0,32 x_1 + 0,22 x_2 + (-0,16)x_3 + (-0,56)x_4 \quad (2)$$

onde: y = descargas atmosféricas; x_1 , x_2 , x_3 e x_4 = CAPE, temperatura máxima do ar, precipitação total e ROL, respectivamente.

5. CONCLUSÕES

O presente relatório apresentou os resultados das análises das modulações climáticas associadas a incidência de descargas atmosféricas no Estado de Santa Catarina.

Conclui-se que, para o período em estudo, há indicativos expressivos da influência de mecanismos oceânico-atmosféricos sobre a atividade de descargas atmosféricas observadas no Estado. Dentre estes mecanismos, têm-se a TSM positiva (mais quentes que a média) em regiões do oceano Índico/Pacífico Oeste, que disparam o movimento ascendente do ar, formando uma oscilação na pressão atmosférica meridional conectando esta região até a América do Sul em um trem de ondas. Como resultado, tem-se movimentos convectivos sobre o Sul do Brasil que, por sua vez, auxiliam a formação de nuvens e, conseqüente, produção de descargas atmosféricas. No estudo de caso, observou-se que, além deste padrão, há também a influência do fenômeno El Niño e do Jato de Baixos Níveis intensificando a já elevada atividade elétrica na região em estudo.

Utilizando a técnica de aprendizagem de máquina, foi possível desenvolver um modelo de regressão múltipla para a previsão de

descargas atmosféricas no Estado de Santa Catarina que, apesar de apresentar pequenos desvios comuns aos modelos de estimativas, mostrou resultados bastante satisfatórios, podendo assim ser utilizado na elaboração do Produto 4, o qual irá realizar as projeções do clima futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COELHO, C. A. S.; DE OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; DA ROCHA, R. P. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11-12, p. 3737-3752, 2016.
- CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. **Análise multivariada: para os cursos de administração, ciências contábeis e economia**. São Paulo: Atlas, p. 280-323, 2007.
- ESCOBAR, G.C.R. Padrões sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo. INPE ePrint: sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/11.28.16.38 v1 2006-11-29. Disponível em: <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2006/11.28.16.38/doc/v1.pdf>. Acesso em 29 de abril de 2019.
- FRAEDRICK K. & M. LUTZ. Zonal teleconnections and longitude-time lag correlation of the 500 mb geopotencial along 50°S. **J. Atmos. Sci.**, 43: 2116-2126, 1986.
- GALVÃO, J. A. C.; FISCH, G. Balanço de radiação em área de pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2000.
- GHIL, M. & MO, K. Intraseasonal Oscillations in the global atmosphere. Part II: Southern Hemisphere. **J. Atmos. Sci.**, 48: 780-790, 1991.
- GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 25, n. 4, 537-554, DOI: 10.1007/s00477-010-0420-1, 2011.
- GRIMM, A. M. & ZILLI, M. T. Interannual variability and seasonal evolution of summer monsoon rainfall in South America. **Journal of Climate**, v. 22, n. 9, p. 2257-2275. DOI: 10.1175/2008JCLI2345.1, 2009
- INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability Summary for Policymakers. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 23p.

- INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by T. F. Stocker et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL IN CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by C. B. Field et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. **Journal of climate**, v. 17, n. 12, p. 2261-2280, 2004.
- MO, K. C.; GHIL, M. Statistics and dynamics of persistent anomalies. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 44, n. 5, p. 877-902, 1987.
- MO, K. C.; PAEGLE, J. N. The Pacific–South American modes and their downstream effects. **Journal of Climate**, v. 21, p. 1211–1229, 2001.
- SANTOS, A. P. P.. **Eventos de Extremos de Descargas Atmosféricas no Estado de São Paulo: Casos Observados e Cenários Futuros.** (Tese de Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/06.06.14.28/doc/publicacao.pdf>. 2017a.
- SANTOS, A. P. P.; PINTO JR., O.; SANTOS, S. R. Q.; LIMA, F.J.L.; SOUZA, E. B; MORAIS, A.A.R.; ÁVILA, E.; PEDERNEIRA, A. Climatic Projections of Lightning in Southeastern Brazil Using CMIP5 Models in RCP's Scenarios 4.5 and 8.5. **AMERICAN JOURNAL OF CLIMATE CHANGE.**, v.06, p.539 - 553, 2017b.
- SANTOS, A. P. P.; COELHO, C. A. S.; PINTO JR., O.; SANTOS, S. R. Q.; LIMA, F. J. L.; SOUZA, E. B. Climatic diagnostics associated with anomalous lightning incidence during the summer 2012/2013 in Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 1, 2017c.
- SOARES, N.; SANTIS, R.; GOLIATT, L.; AGUIAR, E. Máquinas de aprendizado extremo para a predição do volume de clones de eucaliptos. CILAMCE 2017. **Proceedings** of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering. 2017.

TAVARES, J.P.N.; DA MOTA, M.A.S. Condições termodinâmicas de eventos de precipitação extrema em Belém-PA durante a estação chuvosa. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.27, n.2, 207 - 218, 2012.

VOLPATO, G. & BARRETO, R. Estatística sem dor. Botucatu: Best Writing, p. 45-50, 2011.

WALLACE, J. M. & GUTZLER, D. S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 4, p. 784-812, 1981.

WILKS, D. S.: **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**, Volume 100. 3rd Edition. Academic Press, 704 pp. 2011.

ZHANG C. Large-scale variability of atmospheric deep convection in relation to sea surface temperature in the tropics. **J. Climate**, 6: 1898–1913, 1993.